

УДК 621.313:621.314

Казачковский Н.Н.<sup>1</sup>, Якупов Д.В.<sup>2</sup>

**УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ С РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНЫМ  
КОНТУРОМ ТОКА ДЛЯ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*В статье рассматривается система управления активным выпрямителем, который является составной частью частотно-регулируемого электропривода. В системе управления применен релейно-векторный контур тока. Представлены результаты моделирования предложенной системы.*

*Введение*

На сегодняшний день частотно-регулируемый электропривод является одним из наиболее эффективных решений для регулирования скорости производственных механизмов. Однако проблемы энергосбережения и электромагнитной совместимости в регулируемом электроприводе по-прежнему остаются актуальными. Это можно объяснить тем, что одним из основных элементов двухзвенных преобразователей регулируемого электропривода является входной выпрямитель. Чаще всего он неуправляемый, реже – управляемый. Следует также отметить, что для электроприводов, работающих в частых тормозных режимах с генерацией энергии, целесообразно возвращать эту энергию в сеть. Неуправляемый выпрямитель является самым распространенным вариантом для электроприводов переменного тока с частотным регулированием малой и средней мощности. Данный вид выпрямителей не обеспечивает ни удовлетворительной совместимости с питающей сетью, ни возможности рекуперации энергии из звена постоянного тока. Использование управляемого выпрямителя в режиме ведомого сетью инвертора позволяет обеспечить передачу энергии в обоих направлениях, однако по-прежнему не обеспечивает достаточных показателей качества передаваемой энергии. Использование инвертора на полностью управляемых ключах двунаправленной проводимости может обеспечить приближенный к единичному коэффициент сдвига фаз  $\cos \varphi$  и минимум высших гармоник тока и решить рассматриваемую задачу.

*Целью* данной работы является рассмотрение системы регулирования активным выпрямителем и предварительная проверка ее работоспособности на математической модели.

*Основные положения*

*Активный выпрямитель.* Структурная схема силовой части активного выпрямителя (АВ) и системы регулирования представлена на рис. 1. Задача системы регулирования – обеспечить передачу только активной мощности через АВ в обоих направлениях. Авторы считают, что данная задача является наиболее целесообразной для систем регулируемого электропривода, работающего в 4-х квадрантах. Поэтому, учитывая данное обстоятельство, представленная система регулирования в отличие от систем, описанных в координатах  $dq$ , является более простой, содержит меньше преобразований и требует меньше вычислений.

Автономный инвертор напряжения (АИН) на полностью управляемых ключах (IGBT, MOSFET, GTO) подключается к сети переменного тока с фазными ЭДС  $e_a, e_b, e_c$  через дроссели  $L_{др}$ . Для качественного регулирования напряжения  $U_d$  на конденсаторе необходимо обеспечить стабильный ток заряда/разряда конденсатора. Это значит, что активный выпрямитель должен работать в режиме источника тока, что возможно при охвате его отрицательной обратной связью по току. При этом, для обеспечения управляемости ключей, напряжение в звене постоянного тока  $U_d$  должно быть больше амплитудного значения линейного напряжения сети

<sup>1</sup> Национальный горный университет, канд. техн. наук, проф.

<sup>2</sup> Национальный горный университет, ассистент

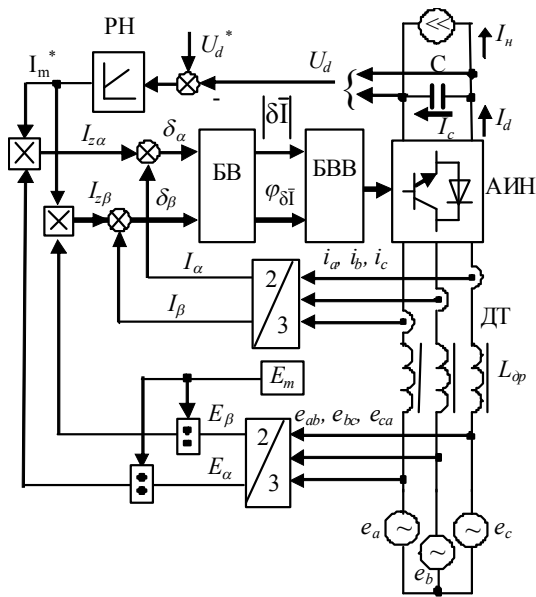


Рис. 1 – Активный выпрямитель

$U_d > U_{лм}$ . Для повышения быстродействия системы регулирования используется релейный векторный алгоритм управления током.

*Контур регулирования тока.* Задание на амплитуду тока инвертора формируется регулятором напряжения РН. Для формирования задания на синусоидальные токи  $I_{z\alpha}$  и  $I_{z\beta}$  измеряются сетевые ЭДС с последующим преобразованием в  $E_\alpha$  и  $E_\beta$ . Полученные значения напряжения делятся на амплитуду фазной ЭДС  $E_m$ . Таким образом, получается синусоида единичной амплитуды, которая умножается на заданную амплитуду тока. В блоке БВ по полученным ошибкам регулирования тока определяются модуль и фаза вектора ошибки тока. Блок БВВ осуществляет выбор необходимого вектора напряжения инвертора по результатам вычисления блока БВ в соответствии со следующим алгоритмом [1].

Вектор ошибки  $\delta\bar{I}$  регулирования тока есть разность между векторами заданного  $\bar{I}_z$  и действительного токов  $\bar{I}$  ( $\delta\bar{I} = \bar{I}_z - \bar{I}$ ). Модуль и фаза вектора ошибки тока определяются через его проекции  $\delta_\alpha$  и  $\delta_\beta$  по осям  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 2, а).

$$\begin{aligned} \delta_\alpha &= I_{z\alpha} - I_\alpha; \\ \delta_\beta &= I_{z\beta} - I_\beta; \\ \delta I &= \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\beta^2}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\delta\varphi = \arctg \frac{\delta_\beta}{\delta_\alpha}. \quad (2)$$

В допустимой области (ДО) радиусом  $\Delta$  модуль ошибки регулирования тока не превосходит допустимой величины.

Выбор текущего состояния АИН производится следующим образом. По проекциям ошибки находятся модуль и фаза вектора ошибки  $\delta\bar{I}$  (1), (2). По фазе определяется сектор, внутри которого расположен вектор ошибки, и выбирается базовый вектор этого сектора (например, согласно рис. 2, б необходимо выбрать вектор  $U_2$ ). При величине ошибки тока, меньшей заданной, сохраняется прежнее состояние инвертора, а следующее переключение произойдет, когда ошибка выйдет за пределы ДО.

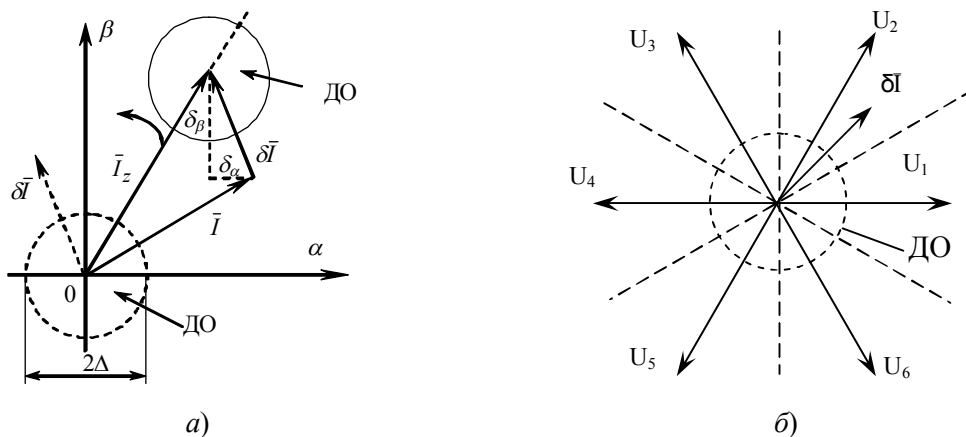


Рис. 2 – Регулирование тока: а - ошибка регулирования тока; б - выбор состояния АИН

*Контур регулирования напряжения.* Для определения передаточной функции регулятора напряжения передаточную функцию свернутого контура тока представим в виде:

$$W_{PH}(p) = \frac{1/k_m}{2T_\mu p + 1},$$

где  $T_\mu$  – малая некомпенсированная постоянная времени, которая включает в себя мертвое время ключей инвертора, вычислительные задержки, период дискретизации системы регулирования, инерционности в канале измерения тока. При расчетах принималась равной  $T_\mu = 0,0005$  с.

Регулятор напряжения формирует задание на амплитуду вектора тока сети (или амплитуду фазного тока  $I_{m\phi}$ ). Соотношение между током  $I_d$  и амплитудным значением фазного тока инвертора  $I_{m\phi}$  найдем из уравнения баланса мощности:

$$U_d I_d = 3E_\phi I_\phi = \frac{3}{2} E_{m\phi} I_{m\phi};$$

$$I_d = \frac{3E_{m\phi} I_{m\phi}}{2U_d},$$

где  $E_\phi$  и  $I_\phi$  – действующие значения ЭДС и тока фазы сети;  $E_{m\phi}$  и  $I_{m\phi}$  – амплитудные значения ЭДС и тока фазы сети.

Структурная схема контура напряжения представлена на рис. 3. Возмущающим воздействием в данной системе является ток инвертора двигателя  $I_n$ . Сделав допущение о постоянстве амплитуды фазной ЭДС сети и напряжения в звене постоянного тока при настройке регулятора напряжения на симметричный оптимум, получим следующую передаточную функцию регулятора напряжения:

$$W_{PH}^*(p) = \frac{k_m C (8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 k_H p};$$

$$W_{PH}(p) = \frac{k_m C (8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 k_H p} \frac{2U_d}{3E_{m\phi}}.$$

Как видно из рис. 3 и передаточной функции  $W_{PH}(p)$ , коэффициенты регулятора зависят от величины возмущений, которыми являются изменение амплитуды сетевой ЭДС  $E_{m\phi}$  и тока нагрузки  $I_n$  (и, как следствие,  $U_d$ ).

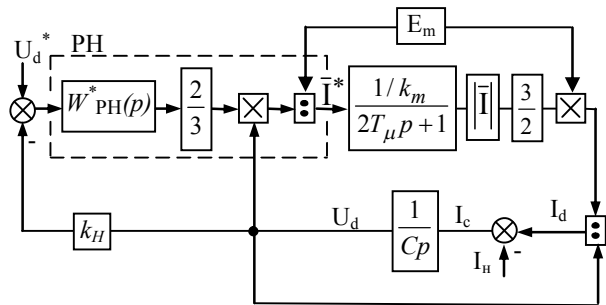


Рис. 3 – Контур регулирования напряжения

### Моделирование

Модель описанной выше системы была реализована в Simulink. При моделировании приняты такие допущения: частота питающего напряжения сети неизменна и равна 50 Гц, система напряжений симметрична, сопротивления и индуктивности фаз равны. В качестве параметров сети переменного тока использовались параметры трансформатора типа ТМ 25/10 со следующими значениями: сопротивление фазы вторичной обмотки  $R_T=0,154$  Ом, индуктивность фазы вторичной обмотки  $L_T=0,77$  мГн, линейное напряжение вторичной обмотки  $U_{Л}=380$  В. Индуктивность сетевого дросселя принята равной  $L_{ДР}=0,0005$  Гн. Номинальный ток нагрузки  $I_H=15$  А. Нагрузка представлена в виде источника тока. Знак тока определяет режим работы нагрузки: “+” – генераторный, “-” – двигательный. Величина емкости звена постоянного тока  $C=5 \times 10^{-4}$  Ф. Емкость выбиралась из расчета 100 мкФ/кВт для двигателя 5 кВт. Напряжение в звене постоянного тока стабилизировалось на уровне  $U_d=560$  В.

Результаты моделирования режима изменения знака тока нагрузки с увеличением тока до максимально допустимого значения при постоянном напряжении сети представлены на рис. 4. Данный режим соответствует переходу двигателя из двигательного режима в режим рекуперативного торможения с максимально допустимым током. На рис. 5 представлены результаты моделирования режима изменения знака тока нагрузки при переходе из рекуперативного торможения к разгону с максимально допустимым током. Как видно из рисунков, система регулирования обеспечивает угол сдвига фаз между напряжением и током, равным  $0^\circ$  в двигательном режиме и  $180^\circ$  в рекуперативном режиме. Форма тока синусоидальная. Однако следует отметить, что в переходных режимах наблюдаются значительные отклонения напряжения  $U_d$  (до

30 %) от заданного значения. Также видно, что переходные процессы фактически заканчиваются за один период напряжения сети.

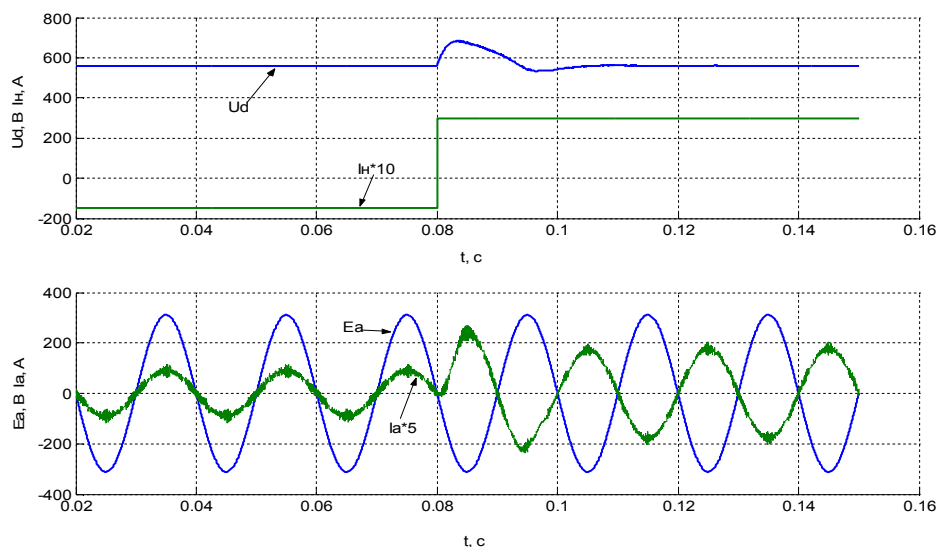


Рис. 4 – Изменение тока нагрузки при переходе из двигательного режима в тормозной

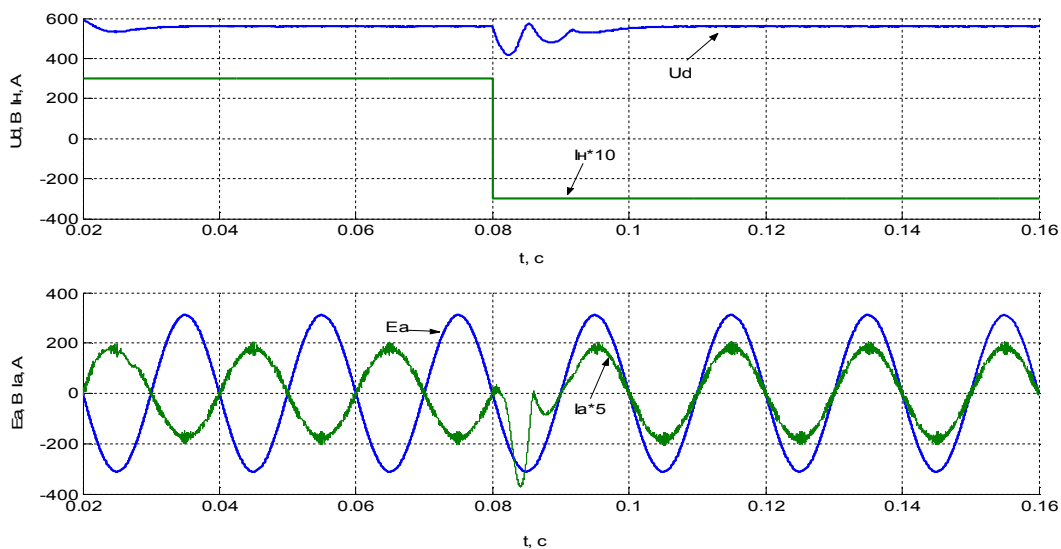


Рис. 5 – Изменение тока нагрузки при переходе из тормозного режима в двигательный

#### Выводы

Предложена система регулирования активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока. Работа системы предварительно проверена на математической модели. Результаты моделирования подтверждают работоспособность системы и показывают, что данная система требует улучшения характеристик путем поиска оптимальных параметров силовой части. Данное направление можно считать следующим шагом в исследовании предлагаемой системы управления активным выпрямителем.

#### Перечень ссылок

1. Казачковский Н.Н. Способ управления векторным релейным регулятором тока в электроприводах с ШИМ / Н.Н. Казачковский, Д.В. Якунов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 3/2004 (26). – С. 46-49.

Рецензент: А.А. Колб,  
канд. техн. наук, проф., НГУ

Статья поступила 25.03.2008